

بهبود دقت اسکنر لیزری برای بازیابی مدل سه بعدی با استفاده از اعمال نوفه

سیده محمد امام (دانشجوی دکتری)

خلیل خلیلی* (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۳۹۳ (نمونه ۳-۳، شماره ۱، ص. ۱۲۵-۱۳۵، یادداشت شریف)

برای بهبود دقت اسکنر سه بعدی کارهای مختلفی، از نظر سخت افزاری و نرم افزاری، انجام گرفته است. یکی از بدیهی ترین پیشنهادها افزایش تعداد آرایه‌های حسگر مورد استفاده است. حسگرهای دارای قدرت تفکیک پذیری بالا دقت را افزایش می دهند، اما همین امر موجب افزایش قیمت و در عین حال ماندگاری بقیه منابع خطا خواهد شد. یکی از روش های افزایش دقت در سیستم هایی که از لحاظ سخت افزاری دارای قدرت تفکیک پذیری پایینی هستند، اعمال نوفه^۱ در سیستم و تکرار عملیات اسکن است. برای اعمال نوفه از جابه جایی جسم در حین تصویربرداری استفاده شده است. برای انجام عملیات اسکن سه بعدی از نور لیزر با توزیع گوسی استفاده شده است. تصاویر با استفاده از دوربین CCD تهیه شده و پس از پردازش آن، اندازه‌ی دوبعدی جسم با استفاده از روش مثلث بندی استخراج می شود. با گرفتن تصاویر متوالی از جسم و اعمال نوفه در حین تصویر برداری، مدل سه بعدی به صورت مدل CAD و با دقت قابل قبول بازیابی می شود.

واژگان کلیدی: اسکن سه بعدی، روش مثلث بندی، بازیابی مدل، اعمال نوفه، بهبود دقت.

sy.m.emam@birjand.ac.ir
khkhalili@birjand.ac.ir

۱. مقدمه

بینایی از مهم ترین حواس انسان و حیوانات است و غالب اطلاعات پیرامونی توسط آن دریافت می شود. بخش عمده‌ی هوشمندی انسان مرتبط با قابلیت تجزیه و تحلیل انبوه اطلاعات دریافت شده توسط بینایی است. فراهم کردن قابلیت بینایی مصنوعی برای یک ماشین، به شدت بر توانمندی آن می افزاید و کاربردهای متعدد و متنوعی را به دنبال دارد. در بسیاری از کاربردها تصاویر فقط به صورت دوبعدی تهیه می شوند؛ این تصاویر حاوی اطلاعات لازم برای آن کاربرد خاص هستند. با توجه به محدودیت های سخت افزاری و نرم افزاری و سرعت پردازش فعلی، استفاده از تصاویر سه بعدی در دیگر موارد نیز توصیه نمی شود. با این وجود در برخی از کاربردها استفاده از تصاویر سه بعدی ضروری است. تصاویر سه بعدی برای اهدافی چون آشکارسازی و درک بهتر جسم توسط بیننده تهیه می شود ولی استفاده بیشتر و دقیق تر برای کاربردهای متعدد زمانی امکان پذیر می شود که بتوان مدلی از جسم تهیه کرد.

در این راستا رهیافت های متفاوتی به منظور اسکن سه بعدی یک موضوع ارائه شده است. اسکنرهای تماسی مبتنی بر حسگرهای مکانیکی و اسکنرهای غیر تماسی مبتنی بر تکنولوژی اپتیک رهیافت هایی هستند که محققان به عنوان روش های اسکن سه بعدی پیش رو دارند.^[۱] در این میان تکنولوژی اپتیک (ماشین بینایی)

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۱۰/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۱/۱۹، پذیرش ۱۳۹۱/۱۲/۱۲.

به دلیل انعطاف پذیری و سرعت بیشتر در رقمی کردن سطوح ترجیح داده می شود. این روش ها از دقت و قدرت تفکیک پذیری قابل قبولی برخوردارند اما روش های بینایی ذکر شده با محدودیت هایی نیز مواجه اند. موارد متعددی مثل دقت لنز، قدرت تفکیک پذیری دوربین، فرایند تبدیل تصویر آنالوگ به دیجیتال و حافظه‌ی مورد استفاده، در تعیین دقت سیستم بینایی دخیل اند. بسیاری از کاربران این سیستم ها به غلط قدرت تفکیک پذیری دوربین را به عنوان دقت سیستم بینایی در نظر می گیرند -- اگرچه به لحاظ نظری دقت دوربین تعیین کننده باشد. امروزه کاربرد دوربین هایی با دقت مگاپیکسل، که از میلیون ها پیکسل در تصویر برداری استفاده می کنند، باعث افزایش دقت شده ولی هنوز برای کنترل ابعادی محدودیت هایی مثل افزایش قیمت برای استفاده از آنها وجود دارد.

استخراج مدل سه بعدی از تصاویر گرفته شده از جسم بر اساس نورهای ساختار یافته، یکی از متداول ترین و دقیق ترین روش های مدل سازی توسط ماشین بینایی است. با این حال، کیفیت پایین و حساسیت به نور محیط از محدودیت های اصلی این فناوری برای کاربردهای عملی است. یکی از روش های موجود برای بهبود دقت، استفاده از الگوهای نوری جدید برای بازسازی مدل اجسام است.^[۱] در این روش از مجموعه‌ی نوارهای نوری رنگی با فواصل نوری سفید استفاده می شود. این الگو دارای طبقه بندی و ترتیب رنگ مشخصی است، و در مقابل نور کنترل نشده‌ی محیط و تداخل رنگ ها کارایی مناسبی دارد. روش دیگر برای بالا بردن دقت مدل سازی با استفاده از

۳. اعمال نوفه برای بهبود دقت

اگر برای اندازه‌گیری جسمی به طول L (mm) از دوربینی با تعداد $N \times M$ حس‌گر (شکل ۲) استفاده شود، بهترین دقت قابل دست‌یابی در راستای قائم برابر L/N واحد میلی‌متر است.^[۳] برای مثال، وقتی از دوربینی متشکل از 1000×1000 حس‌گر برای اندازه‌گیری جسمی به طول 100 mm استفاده شود، در بهترین حالت دقت برابر 0.1 mm است. بنابراین در صورت بروز خطا در دو لبه‌ی جسم، طول اندازه‌گیری شده $L \pm 0.1$ و بیشینه خطا 0.2 mm است. البته در تخمین خطای ذکر شده از بقیه‌ی منابع خطا -- نظیر تغییرات نور محیط و ... -- صرف‌نظر شده است. در بیشتر سیستم‌های صنعتی دقت از درجه 0.1 تا 0.7 میلی‌متر است. بنابراین طول استخراج شده‌ی جسم (L_r) توسط سیستم فوق و با توجه به حد آستانه، مطابق فرمول ۳ تخمین زده می‌شود.

$$L_r = [L - X] + 1 \pm 1 \quad (3)$$

بنابراین عدم اطمینان از مقدار اندازه‌گیری ۲ پیکسل است. تکرار تصویربرداری فقط باعث کاهش خطاهای تصادفی موجود در سیستم شده و کمینه خطا را کاهش نخواهد داد، ولی با تغییر موقعیت نسبی دوربین و جسم و استفاده از ترکیب تصاویر گرفته شده کاهش خطا امکان‌پذیر است. با توجه به موقعیت تصادفی جسم در آرایه‌ی دوربین و امکان قرارگیری لبه‌ی جسم در هر موقعیتی از پیکسل، طول اندازه‌گیری شده از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

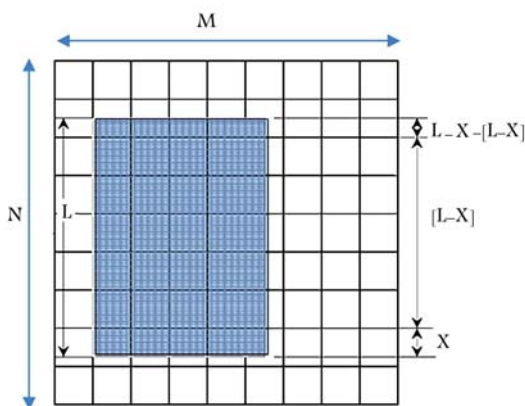
$$L_r = [L - X] + Tr(X) + Tr(L - X - [L - X]) \quad (4)$$

که در آن $Tr(0)$ تابع حد آستانه است که طبق فرمول ۵ تعریف می‌شود:

$$Tr(Z) = \begin{cases} 1 & Z \geq T \\ 0 & Z < T \end{cases} \quad (5)$$

که در آن T مقدار حد آستانه است و بنابراین L_r تابعی از عدد تصادفی X است. میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از فرمول ۶ محاسبه می‌شود.

$$\mu_{L_r} = E(L_r) \quad (6)$$



شکل ۲. محل قرارگیری تصویر جسم در حس‌گر دوربین.^[۳]

تجهیزات کم دقت، اعمال نوفه است.^[۳] اعمال نوفه از طریق جابه‌جایی دوربین یا جسم، جابه‌جایی منبع نوری، و تغییرات روشنایی محیط در حین تصویربرداری امکان‌پذیر است. با تکرار زیاد آزمایش برای موقعیت‌های مختلف حس‌گر و جسم (جابه‌جایی دوربین یا جسم)، امکان کاهش خطا تا حد صفر وجود دارد. اگرچه به لحاظ نظری تعداد دقیق مراحل آزمایش برای رسیدن به این دقت مشخص نیست، با انجام تعداد محدودی تکرار دقت افزایش می‌یابد. در صورت صرف زمان بیشتر می‌توان به دقت‌های بسیار زیادتری نیز دست یافت. تکرار آزمایش برای افزایش دقت بسیار ساده است و نیاز به تجهیزات خاصی ندارد؛ کافی است بعد از هر تصویربرداری موقعیت دوربین یا جسم اندکی (به اندازه‌ی کسری از میلی‌متر) جابه‌جا شود.^[۵] این روش به دیگر روش‌ها وابستگی ندارد و قابل ادغام با آنهاست. در این نوشتار با استفاده از روش مثلث‌بندی، مدل سه‌بعدی جسم بازتابی شده و به منظور بهبود دقت از روش اعمال نوفه استفاده شده است. مشاهده می‌شود با جابه‌جایی جسم در راستای افقی و عمودی در صفحه‌ی موازی با صفحه‌ی تصویر می‌توان به دقت بسیار خوبی دست یافت.

۲. روش مثلث‌بندی لیزری

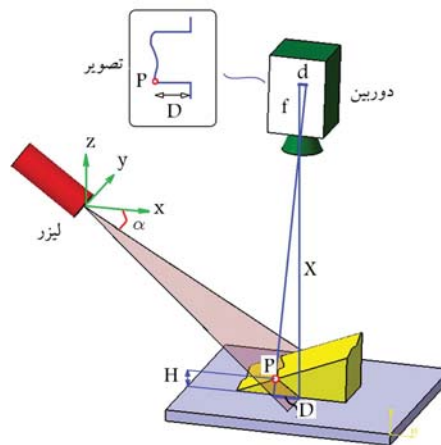
یکی از معروف‌ترین روش‌ها در اسکن سه‌بعدی روش «مثلث‌بندی نوری» است. در شکل ۱ تصویر شماتیک این اسکنر نشان داده شده است. در این روش پرتوی نور باید به سطح مبنا (سطحی که ارتفاع قطعه‌ی مورد اندازه‌گیری نسبت به آن سنجیده می‌شود) و سطح مورد اندازه‌گیری برخورد کند و انعکاس آن توسط دوربین دریافت شود. بنابراین با داشتن فاصله‌ی لنز نسبت به حس‌گر دوربین و همچنین فاصله‌ی سطح مبنا نسبت به لنز می‌توان ارتفاع جسم (H) را در تک‌تک نقاط به دست آورد. اگر فاصله‌ی سطح مبنا تا لنز دوربین X ، فاصله‌ی لنز تا حس‌گر f ، و اندازه‌ی تصویر در حس‌گر نیز d باشد، مقدار D طبق فرمول ۱ محاسبه می‌شود.

$$\frac{D}{X} = \frac{d}{f} \Rightarrow D = \frac{Xd}{f} \quad (1)$$

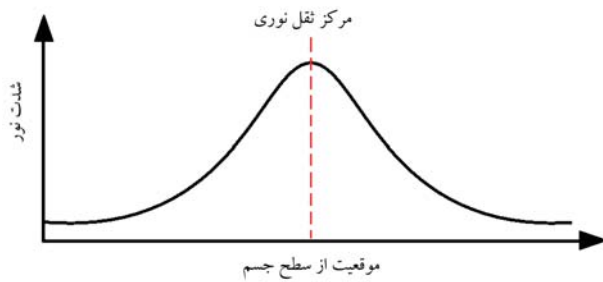
حال با به دست آوردن مقدار D ، ارتفاع (ضخامت) با توجه به شکل و هندسه‌ی سیستم از فرمول ۲ محاسبه می‌شود:

$$H = D \cdot \tan \alpha \quad (2)$$

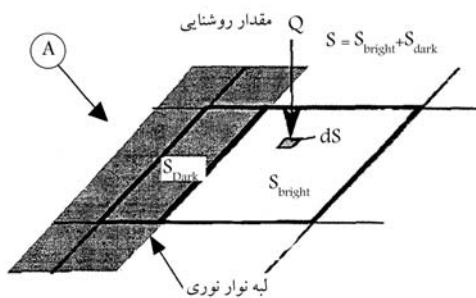
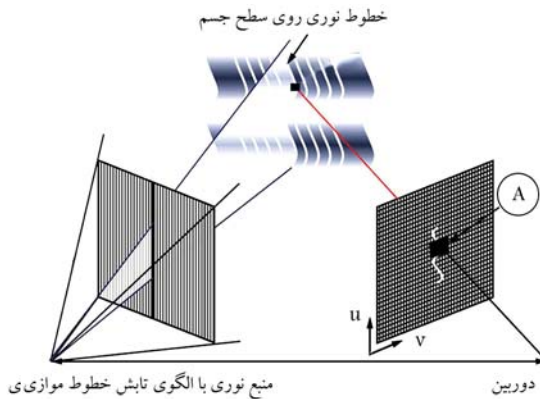
که در آن H ارتفاع قطعه، و α زاویه‌ی تابش لیزر نسبت به افق است.



شکل ۱. اندازه‌گیری ارتفاع به روش مثلث‌بندی.



شکل ۴. توزیع شدت نور تابیده شده روی جسم در نقطه P. [۶]



شکل ۵. محل قرارگیری لبه نوار نوری در یک پیکسل. [۶]

حالت فرض می‌شود که ضخامت هر خط به اندازه‌ی یک پرتو در روش الگوی نور خطی باشد، آنگاه برای هر خط یک مقدار θ محاسبه می‌شود. در این حالت در هر نوار نوری تعداد بیشتری پیکسل وجود دارد که زاویه‌ی θ برای تمامی آنها یکسان در نظر گرفته شده و خطای به وجود آمده نسبت به الگوی نور خطی بیشتر است. برای کاهش این خطا می‌توان به جای استفاده از پهنای هر نوار از لبه‌ی هر نوار برای استخراج مختصات پیکسل‌های واقع بر آن استفاده کرد. مطابق شکل ۵ مساحت کوچکی داخل پیکسل با ds نشان داده شده که دارای مقدار روشنایی Q است. بنابراین مقدار روشنایی کل پیکسل برابر است با L :

$$L = C \int_S Q ds = CQS \quad (10)$$

S نشانگر مساحت یک پیکسل و C ضریب ثابتی است که با توجه به دوربین CCD انتخاب شده است. بنابراین در حالتی که روشنایی نقاط پیکسل برابر باشد، مقدار روشنایی کل از رابطه‌ی ۱۰ قابل محاسبه است. در حالتی که لبه‌ی نوار نوری داخل پیکسل قرار بگیرد و قسمتی از آن تاریک و قسمتی روشن باشد روشنایی

که در آن $E(0)$ نشانگر امید ریاضی است. با جایگذاری رابطه‌ی ۴ در رابطه‌ی ۶ خواهیم داشت:

$$\mu_{L_r} = \frac{E([L - X])}{I} + \frac{E(Tr(X))}{II} + \frac{E(Tr(L - X - [L - X]))}{III} \quad (7)$$

و با محاسبه‌ی مجزای هر کدام از قسمت‌های سه‌گانه‌ی فرمول ۷ برای محاسبه‌ی μ_{L_r} مقدار امید ریاضی و خطای اندازه‌گیری مطابق فرمول ۸ به دست خواهد آمد.

$$E(L_r) = L - 1 + 1 - T + 1 - T = L + 1 - 2T$$

$$E(\text{Error}) = E(L_r - L) = 1 - 2T \quad (8)$$

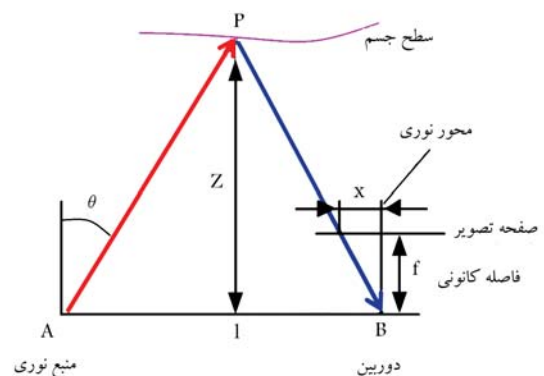
مشاهده می‌شود اگر حد آستانه 0.5 در نظر گرفته شود، مقدار خطا برابر صفر است. البته برای رسیدن به دقت فوق، تکرار زیاد (نامعلوم) مراحل آزمایش برای موقعیت‌های نسبی تصادفی بین دوربین و جسم الزامی است، ولی با انجام تعداد محدودی تکرار دقت افزایش خواهد داشت. بنابراین با گرفتن تصاویر متعدد از جسم و محاسبه‌ی اندازه‌ی جسم از میانگین این تصاویر، امکان افزایش دقت وجود دارد. در ادامه‌ی اعمال نوبه با استفاده از روش فوق مثلث‌بندی مورد بررسی قرار می‌گیرد. [۶] در شکل ۳ ساختار روش مثلث‌بندی نشان داده شده است.

خط AP نوار نوری تابیده شده بر جسم است که با محور نرمال صفحه‌ی تصویر زاویه‌ی θ دارد. فاصله‌ی نقطه‌ی P تا محل دوربین با استفاده از فرمول ۹ محاسبه می‌شود:

$$z = \frac{fl}{(x + \tan \theta)} \quad (9)$$

که در آن خطای موجود در z مربوط به خطای موجود در f, l, x و θ است. پارامتر f و l برای سیستم ثابت است و قابل کنترل نخواهد بود. بنابراین خطای اندازه‌گیری به خطای پارامترهای x و θ وابسته است. با توجه به توزیع شدت نور در پرتو نوری تابیده شده در نقطه‌ی P (شکل ۴)، محاسبه‌ی مقدار x با خطا مواجه خواهد شد. البته می‌توان مقدار خطا را با در نظر گرفتن مرکز ثقل این نمودار به عنوان محل قرارگیری نوار نوری کاهش داد. روش دیگر برای مدل‌سازی، استفاده از الگوی نوارهای نوری تابیده شده بر جسم است (شکل ۵).

مزیت استفاده از الگوی نوری (مطابق شکل ۵) نسبت به الگوی تک‌خط این است که برای اسکن مدل به تعداد عکس‌برداری کم‌تری نیاز دارد. در این



شکل ۳. هندسه‌ی روش مثلث‌بندی برای بازیابی عمق. [۶]

پیکسل L' طبق فرمول ۱۱ قابل محاسبه است:

$$L' = C \left(\int_{S_{\text{bright}}} Q_{\text{bright}} dS + \int_{S_{\text{dark}}} Q_{\text{dark}} dS \right) \quad (11)$$

$$= C(Q_{\text{bright}} S_{\text{bright}} + Q_{\text{dark}} S_{\text{dark}})$$

که در آن S_{dark} و Q_{dark} به ترتیب مساحت و مقدار روشنایی قسمت تاریک پیکسل، و S_{bright} و Q_{bright} به ترتیب مساحت و مقدار روشنایی قسمت روشن پیکسل است. بنابراین سهم قسمت روشن و تاریک هر پیکسل با استفاده از فرمول ۱۲ به دست می آید:

$$t = \frac{S_{\text{bright}}}{S}, \quad 1 - t = \frac{S_{\text{dark}}}{S}, \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (12)$$

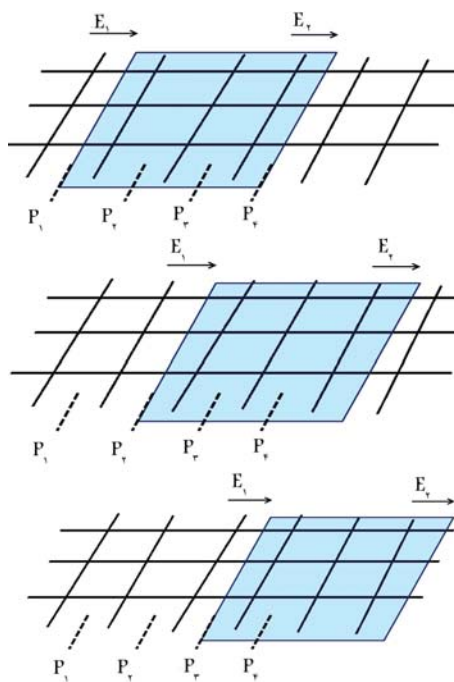
با جایگذاری فرمول ۱۲ در فرمول ۱۱ مقدار روشنایی برابر خواهد شد با:

$$L' = tCSQ_{\text{bright}} + (1-t)CSQ_{\text{dark}} \quad (13)$$

با نامگذاری CSQ_{bright} و CSQ_{dark} به L_{bright} و L_{dark} رابطه ی ۱۳ به فرمول ۱۴ تبدیل می شود:

$$L' = tL_{\text{bright}} + (1-t)L_{\text{dark}} \quad (14)$$

با استفاده از این فرمول محل دقیق لبه در هر جای پیکسل قابل تشخیص است. به عنوان مثال، اگر هدف استخراج محل لبه در مرکز (وسط) یک پیکسل باشد، با قرار دادن $t = 0.5$ در فرمول ۱۴، فقط باید به جست و جوی پیکسل هایی پرداخت که مقدار روشنایی آنها در این رابطه صدق می کند. از آنجا که لبه ی نوار نوری فقط داخل بعضی از پیکسل ها قرار می گیرد، مقداری خطا برای بقیه ی پیکسل ها به وجود خواهد آمد. برای رفع این مشکل الگوی نوری را باید اندکی جابه جا کرد. بنابراین هر پیکسل دست کم با یک لبه تداخل می کند. مطابق شکل ۶ فرض کنید لبه ی E_1



شکل ۶. جابه جایی الگوی نوری در دوربین CCD.

و E_2 در پیکسل P_1 و P_2 قرار دارد و فاصله ی بین آنها حدوداً ۳ پیکسل است. با جابه جایی جزئی نوار نوری به سمت راست، که با تغییر زاویه ی $d\theta$ ایجاد می شود، پیکسل های p_2 و p_3 نیز با لبه ی E_1 تداخل می کند. بنابراین با جابه جایی کل الگوی نوری به اندازه ی پهنای یکی از نوارهای نوری، تمام پیکسل ها با لبه تداخل می کنند. در نتیجه، محاسبه ی t و افزایش دقت در اندازه گیری x و θ -- که پیش تر به عنوان منشاء خطا در اندازه گیری عمق تلقی شده بود -- ممکن خواهد شد. با استفاده از روش مثلث بندی با الگوی نور خطی برای داشتن دقتی به اندازه ی N در راستای افق باید N عکس گرفته شود، در صورتی که در این روش برای داشتن همان دقت، تعداد $\log_2 N$ عکس مورد نیاز است. در این روش یک عکس در حالتی که پرتو نوری تمام آن را پوشیده، یک عکس بدون تابش نور (تصویر پس زمینه)، و عکس هایی که الگوی نوری در آنها جابه جایی جزئی داشته، مورد نیاز است. با استفاده از عکس اول و دوم به ترتیب مقدار L_{bright} و L_{dark} برای هر پیکسل محاسبه می شود. اگر تعداد جابه جایی های جزئی برابر m باشد، تعداد عکس مورد نیاز $(\log_2 N + m + 2)$ و تعداد جابه جایی (m) با توجه به تغییرات زاویه یی ($d\theta$) مشخص می شود.

۴. اجزاء سیستم مورد استفاده

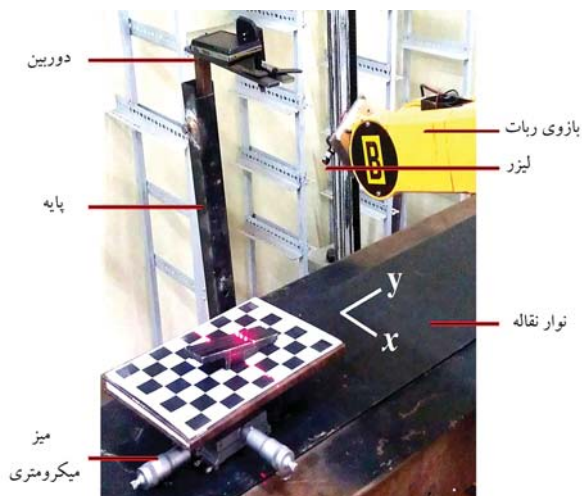
سیستم اندازه گیری مورد استفاده در این مقاله از نوع اسکنر لیزری و مبتنی بر روش مثلث بندی نوری همراه با تجهیزات ثابت است، بدین ترتیب که سیستم نوری و دوربین ثابت و قطعه متحرک است. سیستم مورد استفاده شامل: واحد اپتوالکترونیکی (منبع نور لیزری با لنز استوانه ای)، واحد تصویربرداری (دوربین دیجیتال)، ربات، نوار نقاله، پایه دوربین، میز میکرومتری (جهت اعمال نوفه)، و رایانه است. در شکل ۷ تعدادی از اجزاء سخت افزاری این سیستم مشاهده می شود. پس از گرفتن تصویر و اعمال نوفه، داده ها به نرم افزار پردازش تصویر منتقل و سپس مدل CAD توسط نرم افزارهای مربوطه استخراج می شود. سیستم طراحی شده به دو قسمت اصلی سخت افزار و نرم افزار تقسیم بندی می شود. در شکل ۸ بلوک نمودار این سیستم نشان داده شده است.

۵. تصویربرداری و اعمال نوفه

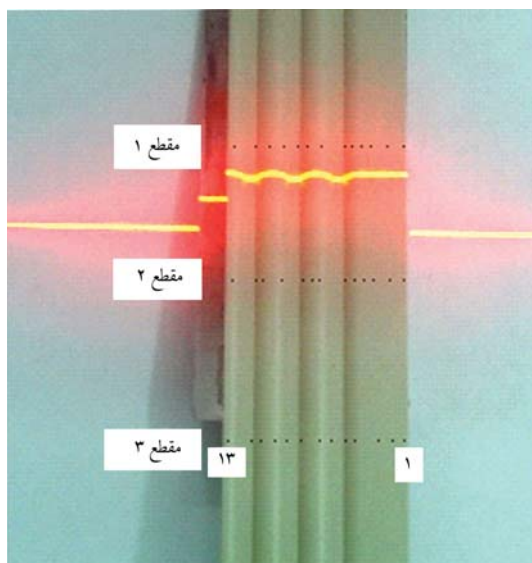
قطعه ی مورد نظر برای بازیابی مدل و اعمال نوفه که از جنس خمیری است، در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰ سیستم اسکنر به منظور تصویربرداری تنظیم می شود. در این مرحله برای راحتی موقعیت دهی لیزر و تنظیم زاویه (کالیبراسیون) تابش آن، لیزر به دست ربات با پنج درجه آزادی متصل شده است. برای به حرکت درآوردن جسم با سرعت و برنامه کنترل شده، از سیستم نوار نقاله استفاده شده است، بنابراین اندازه گیری مقاطع مختلف از جسم با حرکت نوار نقاله و ثابت ماندن لیزر و دوربین امکان پذیر است. دوربین دیجیتالی از نوع CCD با قدرت تفکیک پذیری ۵ مگاپیکسل انتخاب شده که در بالای جسم توسط پایه به نوار نقاله ثابت و در زمان های تعیین شده از جسم متحرک تصویر می گیرد. برای اعمال نوفه در هر مرحله از تصویربرداری، قطعه توسط میز میکرومتری و توسط دو پیچ دقیق در دو جهت (حرکت در صفحه ی موازی با نوار نقاله) تغییر مکان جزئی خواهد داشت (شکل ۱۰). برای داشتن تعداد نقاط بیشتر با عمق های متفاوت (شکل ۱۱)، اندازه ی قطعه در سه مقطع بررسی خواهد شد. در مرحله ی اول، اندازه ی دوبعدی جسم در هر یک از



شکل ۹. قطعه‌ی انتخابی برای بازیابی مدل.



شکل ۱۰. نحوه‌ی اتصال اجزاء سخت‌افزار.



شکل ۱۱. اعمال روش بازیابی در سه مقطع جسم.



(ب) ربات؛



(الف) دوربین؛



(د) لیزر؛

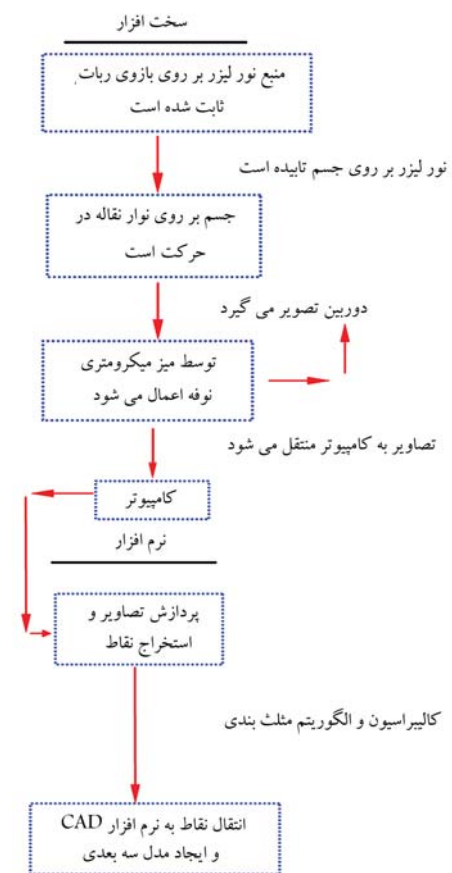


(ج) نوار نقاله؛



(ه) میز میکرومتری.

شکل ۷. اجزاء سخت‌افزاری سیستم مورد استفاده.



شکل ۸. نمودار کلی سیستم طراحی شده.

مقاطع با تاباندن الگوی نور لیزر خطی استخراج می شود و در مرحله ی بعد با استفاده از دو تصویر اضافی که بعد از جابه جایی جزئی گرفته شده، اندازه مجدداً محاسبه و میزان دقت با هم مقایسه می شود.

۶. کالیبراسیون

مهم ترین بخش، قبل از بازیابی مدل با استفاده از روش های اپتیکی، عملیات کالیبراسیون است. با انجام این مرحله امکان تبدیل مختصات جسم از واحد تصویر (پیکسل) به واحد متریک مورد نظر امکان پذیر است. کالیبراسیون شامل تشخیص و معرفی موقعیت مکانی دوربین و لیزر و در نهایت برقراری ارتباط بین آنهاست. در ادامه فرایند کالیبراسیون تشریح خواهد شد.

۱.۱.۶. کالیبراسیون دوربین

در فرایند کالیبراسیون دوربین استخراج پارامترهای مورد نیاز برای تعیین مختصات صفحه ی تصویر نسبت به مختصات مرجع اندازه گیری مورد نظر ضروری است. این پارامترها عبارت اند از:

-- پارامترهای بیرونی، شامل عناصر بردار انتقال مبدأ از دستگاه مختصات مرجع به دستگاه مختصات دوربین، و ماتریس چرخش متناظر آن.

-- پارامترهای درونی، که موجب انتقال سه بعدی در دستگاه مختصات یک دوربین خاص به دستگاه مختصات دوبعدی صفحه ی تصویر می شود (مثل فاصله ی کانونی دوربین و ضرایب مربوط به اعوجاج لنز).

یکی از متداول ترین روش های کالیبراسیون، استفاده از مختصات چند نقطه ی معلوم و برقراری ارتباط بین این نقاط و نقاط متناظر آن در تصویر است، که در اینجا از صفحه ی کالیبراسیون شطرنجی مطابق شکل ۱۰ استفاده شده است. لازم به ذکر است که صفحه ی شطرنجی یادشده (مربع های ۳ × ۳ سانتی متر) روی کاغذ گلاسه با قابلیت جذب رطوبت پایین چاپ شده است تا در شرایط آزمایشگاه مقاوم، و تغییرات اندازه ی آن ناچیز باشد. فرض کنید نقطه یی با مشخصات معلوم A' روی صفحه ی شطرنجی مطابق شکل ۱۲ دارای تصویر A باشد. بنابراین سه نقطه ی C ، A و A' روی یک خط راست قرار دارند و باید در فرمول ۱۵ صدق کنند:

$$P \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (15)$$

ضریب P در فرمول ۱۵ با توجه به مختصات سه نقطه ی مورد نظر و با استفاده از فرمول ۱۶ قابل محاسبه است. بنابراین با محاسبه ی رابطه ی بین نقاط صفحه ی کالیبراسیون و نقاط تصویر، پارامترهای بیرونی و درونی دوربین محاسبه می شود.

$$P = \frac{|A'C|}{|AC|} = \frac{X_{A'C}}{X_{AC}} = \frac{Y_{A'C}}{Y_{AC}} = \frac{Z_{A'C}}{Z_{AC}} \quad (16)$$

۱.۱.۶. نتایج و پارامترهای حاصل از کالیبراسیون دوربین

ده پارامتر مورد نیاز در فرایند کالیبراسیون عبارت اند از:

α, β و δ : زاویه ی چرخش محور مختصات دوربین نسبت به مختصات مرجع، حول محور x, y و z ؛

dx, dy و dz : بردار انتقال محور مختصات دوربین نسبت به مختصات مرجع، در جهت محور x, y و z ؛

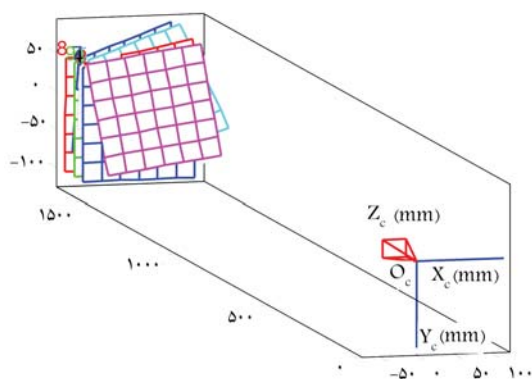
a, b, c, d : درایه های ماتریس تصحیح خطای اعوجاج لنز و شرایط محیطی مثل شکست نور و...

f : فاصله ی کانونی.

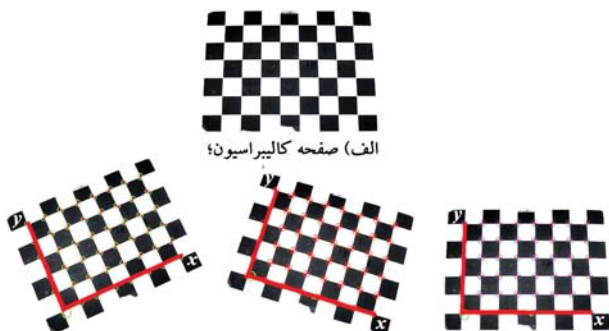
بنابراین با توجه به تعداد این پارامترها به 10 معادله نیاز داریم. با استفاده از پنج نقطه (دو معادله برای x و y) روی صفحه ی کالیبراسیون و تصویر آنها استخراج پارامترهای کالیبراسیون امکان پذیر است، ولی برای بالا بردن دقت از 48 نقطه ی موجود در صفحه ی کالیبراسیون استفاده شده است. همچنین از این صفحه در 10° موقعیت مختلف عکس برداری شده است (شکل ۱۳).

در شکل ۱۴ استخراج نقاط موجود در صفحه ی کالیبراسیون در سه موقعیت مختلف نشان داده شده است.

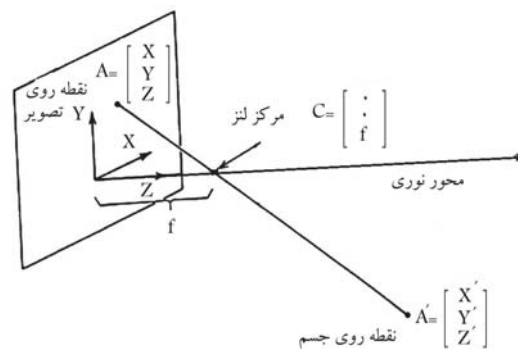
با استفاده از نرم افزار MATLAB و با استفاده از 48° نقطه یی که در قسمت



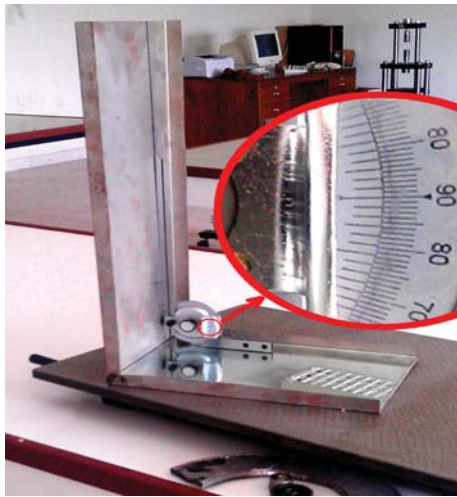
شکل ۱۳. موقعیت دوربین و صفحه ی کالیبراسیون.



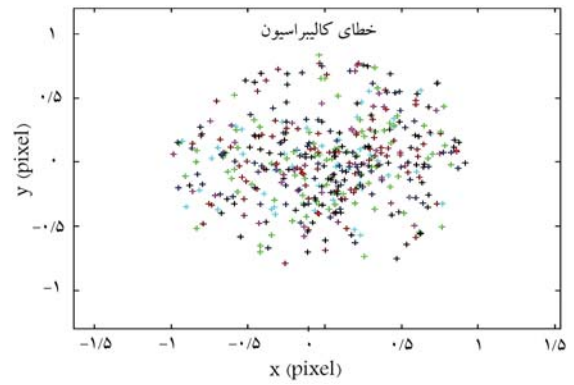
شکل ۱۴. کالیبراسیون دوربین با استفاده از صفحه شطرنجی.



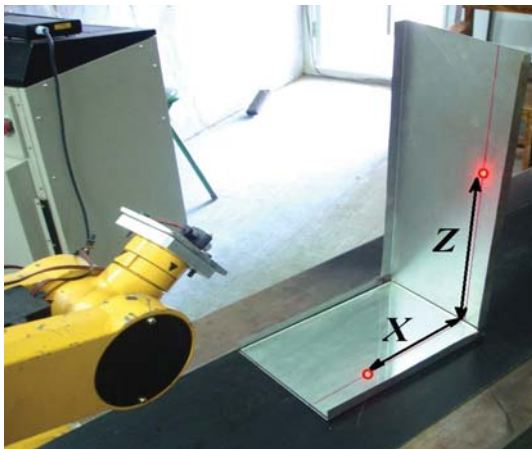
شکل ۱۲. سه نقطه روی یک خط راست.



شکل ۱۶. اندازه‌گیری زاویه‌ی صفحه‌ی L شکل.



ن.



شکل ۱۷. کالیبراسیون لیزر با استفاده از آینه‌ی L شکل.

$$\begin{bmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} - \\ - \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} - & & \\ & - & \\ & & - \end{bmatrix}$$

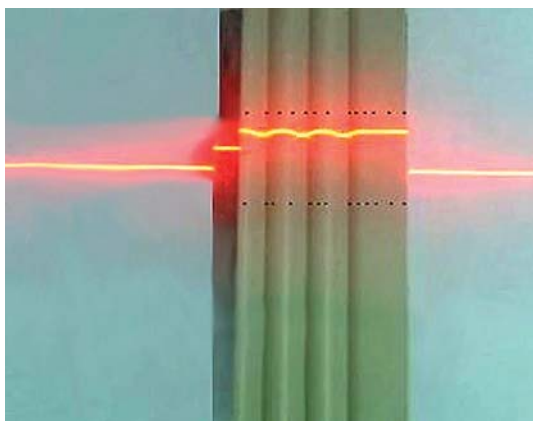
جدول ۱. محاسبه‌ی زاویه‌ی تابش لیزر.

| شماره تکرار | Z (mm) | Y (mm) | θ° | θ° میانگین |
|-------------|----------|----------|----------------|------------------------|
| ۱ | ۱۸۵,۱۵۳ | ۱۰۲,۶۵۴ | ۶۰,۹۹۵ | |
| ۲ | ۲۱۱,۳۵۴ | ۱۱۷,۸۳۴ | ۶۰,۸۵۹ | |
| ۳ | ۲۵۱,۵۴۲ | ۱۳۹,۵۲ | ۶۰,۹۸۵ | ۶۰,۹۴۷ |
| ۴ | ۲۹۹,۵۰۱ | ۱۶۶,۵۹۲ | ۶۰,۹۱۶ | |
| ۵ | ۳۵۲,۳۲۱ | ۱۹۵,۴۶۷ | ۶۰,۹۷۹ | |

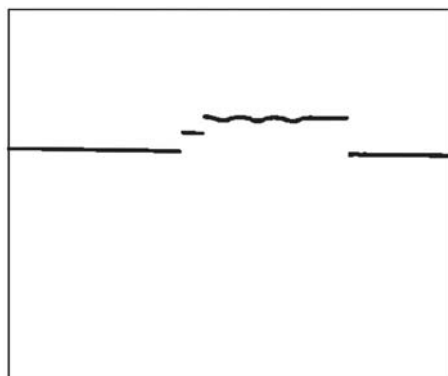
۲.۶. کالیبراسیون لیزر

برای افزایش دقت با جابه‌جایی صفحه‌ی L شکل در راستای حرکت نوار نقاله (y) ، پس از ۵ بار تکرار اندازه‌گیری (مطابق جدول ۱)، زاویه‌ی تابش لیزر محاسبه می‌شود. چنان‌که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، در توزیع گوسی، شدت روشنایی نور در مرکز خط بیشتر از طرفین آن (نقاط انتهایی خط) است. بنابراین در لیزرهای گوسی اگر زاویه‌ی تابش قائمه نباشد، باعث جابه‌جایی پیک شدت روشنایی لیزر در طول خط لیزر می‌شود. لذا برای ایجاد نور لیزر با روشنایی یکنواخت روی جسم لازم است پرتو تابش، پرتو بازتابش و خط عمود بر سطح تابش در یک صفحه قرار داشته باشند (شکل ۱۹). با استفاده از صفحه‌ی L شکل، و با تغییر زاویه‌ی میج ربات، انحراف جانبی پرتو نور به صفر رسانیده می‌شود ($e = 0$)، و همین امر موجب برقراری شرط فوق می‌شود. [۷]

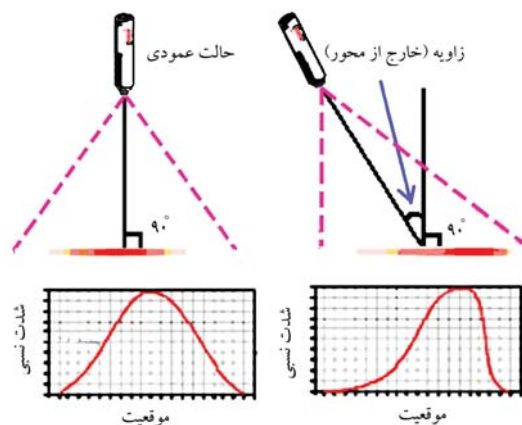
\pm



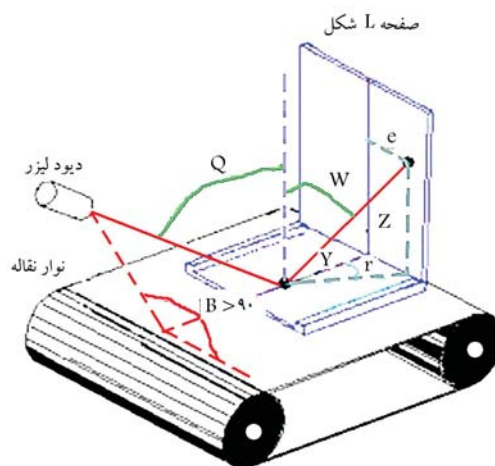
شکل ۲۰. تصویر اولیه قبل از پردازش تصویر.



شکل ۲۱. تصویر نهایی پس از اعمال پردازش تصویر.

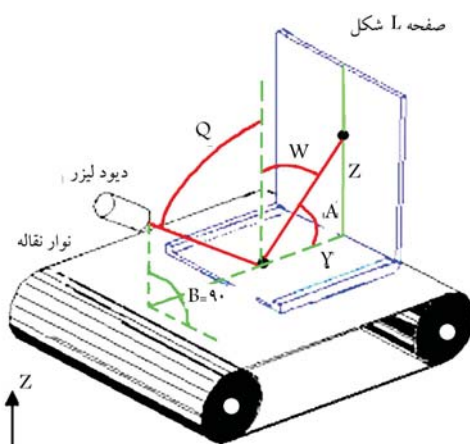


شکل ۱۸. توزیع شدت روشنایی در لیزرهای گوسی.



(الف) قبل از کالیبراسیون؛

$$B \neq 90$$



(ب) بعد از کالیبراسیون.

$$B = 90$$

شکل ۱۹. نحوه‌ی برقراری شرط استقرار محور اپتیکی لیزر دیود در صفحه‌ی عمود بر سطح نوار نقاله.

۷. پردازش تصویر

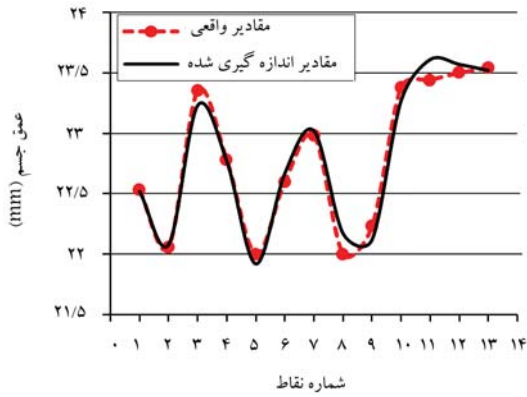
ابتدا باید تصاویر گرفته شده از نظر رنگ، لبه و دیگر مشخصه‌ی بهبوددهی و موارد اضافی -- نظیر نوفه‌ی موجود در زمینه که حاصل شرایط نورپردازی است -- حذف شود. برای این منظور از نرم‌افزار قدرتمند پردازش تصویر national instruments vision v۸.۲.۱ استفاده شده است. در شکل ۲۰ عکس اولیه و ورودی به نرم‌افزار قبل از انجام هرگونه پردازشی نشان داده شده است. پس از انجام عملیات بهبوددهی، تصویر خروجی از این مرحله به صورت دودویی تبدیل شده و به عنوان ورودی به بخش محاسبات فرستاده می‌شود.^[۸]

برای ارسال تصویر به بخش محاسبات و استخراج اندازه‌ی جسم باید تصویر دودویی شود و نوار نوری لیزر از بقیه‌ی تصویر جدا شود. در شکل ۲۱ تصویر نهایی پس از اتمام مراحل پردازش نشان داده شده است.

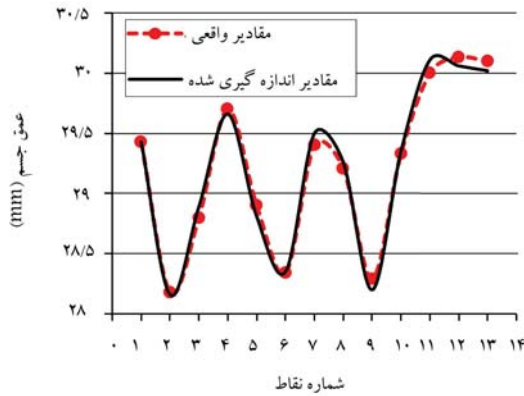
۸. استخراج عمق و اندازه‌ی دوبعدی جسم

۱.۸. بازیابی مدل بدون اعمال نوفه

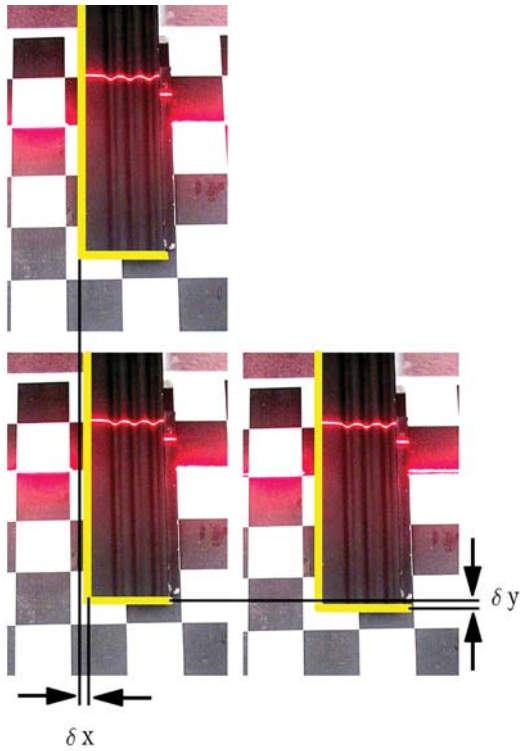
با استفاده از روش مثلث بندی می‌توان عمق یا ضخامت را در نقاط مختلف استخراج کرد. برای محاسبه‌ی خطا، از دستگاه CMM با کنترلر Renishaw ساخت شرکت Johansson به ابعاد میز ۸۰۰ × ۱۵۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر و دقت اسمی یک میکرون استفاده شده است. مطابق شکل ۲۲ ضخامت نقاط نسبت به صفحه‌ی کالیبراسیون، استخراج شده است. لازم به ذکر است برای اندازه‌گیری مقدار واقعی



شکل ۲۴. مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده در مقطع ۲ (mm) 0.17 بیشینه خطا و 0.66 میانگین خطا).



شکل ۲۵. مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده در مقطع ۳ (mm) 0.11 بیشینه خطا و 0.59 میانگین خطا).



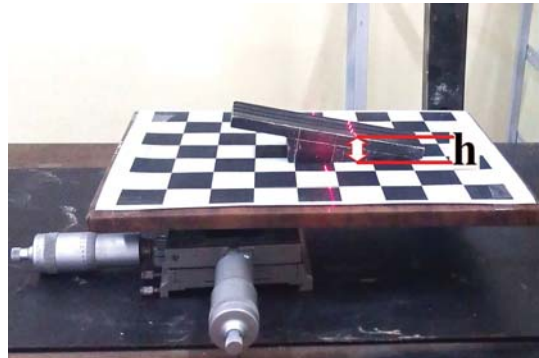
شکل ۲۶. اعمال نوبه در جهت x و y با استفاده از میز میکرومتری.

عمق در نقاط مشخص شده در شکل ۱۱، ابتدا در محل نقاط مذکور سوراخی به قطر تقریبی ۱ میلی‌متر ایجاد شده است تا به وسیله‌ی پرآب دستگاه CMM، اندازه‌گیری مختصات امکان‌پذیر باشد. در شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده توسط روش مثلث‌بندی برای ۱۳ نقطه، و در ۳ مقطع براساس شکل ۱۱ نشان داده شده است.

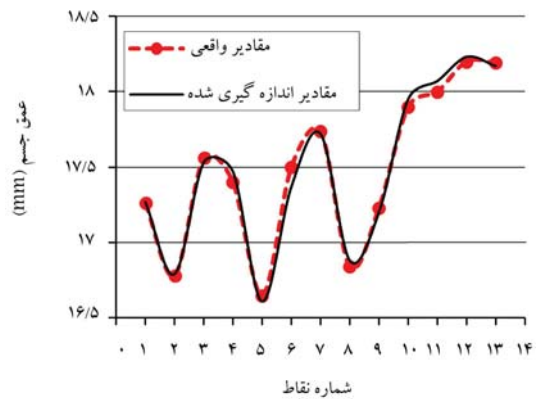
۲.۸. بازیابی مدل بدون اعمال نوبه

در این مرحله ابتدا از سه مقطع نشان داده شده در شکل ۱۱ تصویر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از میز میکرومتری (شکل ۱۰)، در دو جهت x و y به قطعه جابه‌جایی جزئی داده می‌شود و عکس‌برداری تکرار می‌شود. در نهایت استخراج اندازه‌ی دوبعدی در هر مقطع با استفاده از ترکیب این سه تصویر انجام می‌شود. در شکل ۲۶ سه تصویر گرفته شده از یک مقطع جسم نشان داده شده است، قابل ذکر است که میز میکرومتری زیر صفحه‌ی کالیبراسیون قرار دارد.

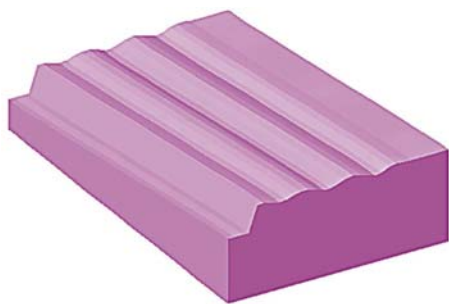
در شکل‌های ۲۷ تا ۲۹ مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده توسط روش مثلث‌بندی برای ۱۳ نقطه و در سه مقطع براساس ترکیب تصاویر گرفته شده قبل از اعمال نوبه، با تصاویر گرفته شده بعد از اعمال نوبه نشان داده شده است. منظور از ترکیب دو یا سه تصویر، استفاده از فرمول‌های ۶ تا ۸ و محاسبه‌ی میانگین اندازه‌های استخراج شده از تصاویر به جای اندازه‌ی ابعاد بازیابی شده از یک تصویر است. با توجه به مقادیر بیشینه و میانگین خطا، بهبود دقت اندازه‌گیری پس از اعمال نوبه، نسبت به مرحله‌ی قبل، آشکار است.



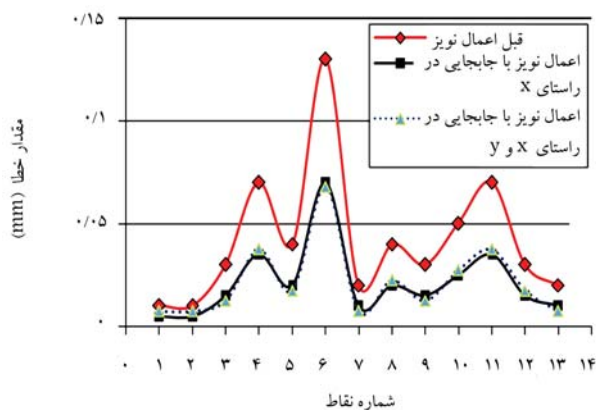
شکل ۲۷. اندازه‌گیری عمق نقاط نسبت به صفحه‌ی کالیبراسیون.



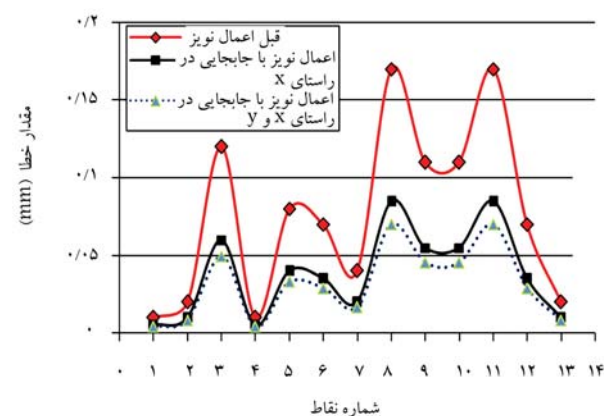
شکل ۲۸. مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده در مقطع ۱ (mm) 0.13 بیشینه خطا و 0.42 میانگین خطا).



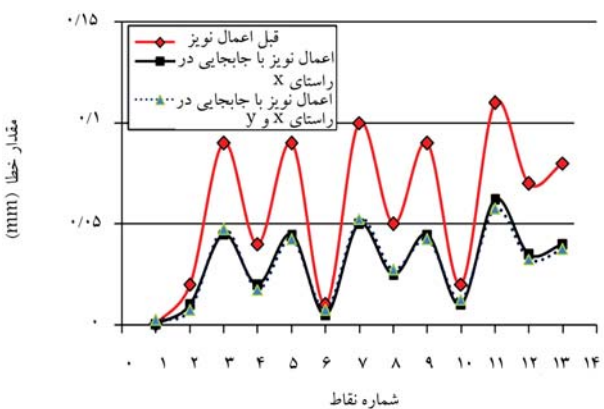
شکل ۳۰. مدل سه بعدی جسم.



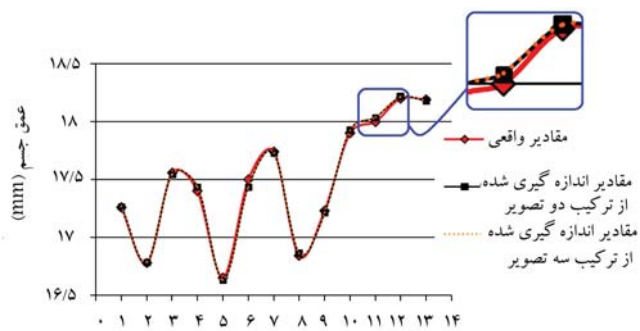
شکل ۳۱. خطای اندازه‌گیری قبل و بعد از اعمال نوبه، مقطع ۱.



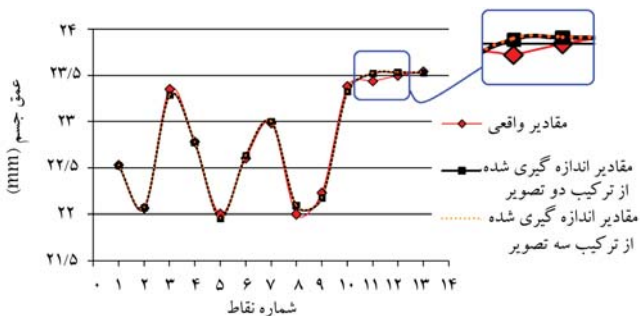
شکل ۳۲. خطای اندازه‌گیری قبل و بعد از اعمال نوبه، مقطع ۲.



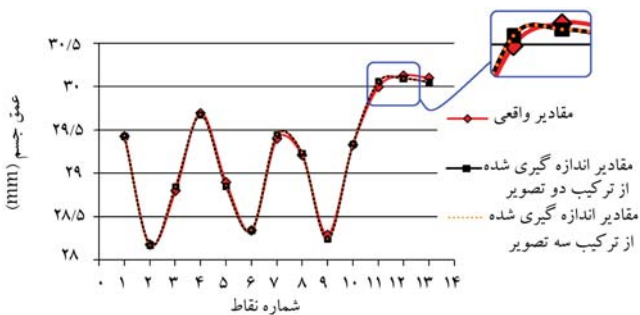
شکل ۳۳. خطای اندازه‌گیری قبل و بعد از اعمال نوبه، مقطع ۳.



شکل ۲۷. مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شدهی مقطع ۱ بعد از اعمال نوبه.



شکل ۲۸. مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شدهی مقطع ۲ بعد از اعمال نوبه.



شکل ۲۹. مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شدهی مقطع ۳ بعد از اعمال نوبه.

۹. استخراج اندازه‌ی سه بعدی و مدل CAD

برای بازیابی مدل CAD در این مرحله، از نرم‌افزار مدل‌سازی Mechanical Desktop و محیط برنامه‌نویسی اتولیسپ استفاده شده است. زبان برنامه‌نویسی اتولیسپ در واقع انتقال‌دهنده‌ی اطلاعات از نرم‌افزار national instruments labview به نرم‌افزار Mechanical Desktop است.^[۸] ابتدا مختصات نقاط استخراج شده در قسمت قبل برای هر تصویر توسط برنامه

کالیبراسیون، با توجه به تعداد پارامترها، به جای استفاده از پنج نقطه با مختصات معلوم، از 48° نقطه (تکرار تصویربرداری از صفحه‌ی کالیبراسیون در 1° موقعیت) به منظور استخراج پارامترهای مربوطه استفاده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در بخش کالیبراسیون، مشاهده می‌شود که دوربین با دقت بسیار خوبی کالیبره شده و بیشینه خطای بین نقاط متناظر کم‌تر از $0.5/^\circ$ پیکسل است. با توجه به اشکال ۳۱ تا ۳۳، مشاهده می‌شود که میزان خطای اندازه‌گیری در سه مقطع از جسم بعد از اعمال نوبه تقریباً 5° درصد کاهش داشته است. لازم به ذکر است که این افزایش دقت با استفاده از ترکیب تصویر اصلی و یک تصویر بعد از جابه‌جایی جزئی به دست آمده است و استفاده از تصویر سوم، کاهش چشم‌گیری در خطا به وجود نیاورده است. مطابق فرمول ۸ امکان کاهش خطا به صفر امکان‌پذیر است، ولی باید از تعداد زیادی تصویر بعد از اعمال نوبه استفاده کرد.

اتولیسپ به عنوان ورودی دریافت شده و با عبور منحنی مناسب، شکل دوبعدی از مقاطع مورد نظر تهیه می‌شود. نهایتاً با استفاده از عملگرهای ایجاد حجم در نرم‌افزارهای CAD، مدل سه‌بعدی از جسم ایجاد می‌شود. در اینجا با توجه به داشتن لبه‌های شکسته و تیز از pline برای ایجاد مقاطع دوبعدی استفاده شده است. در شکل 30° مدل سه‌بعدی جسم که از سه مقطع توضیح داده شده عبور می‌کند، نشان داده شده است.

۱۰. نتیجه‌گیری

در این نوشتار از روش اعمال نوبه برای بالا بردن دقت بازیابی مدل استفاده و در نهایت مدل سه‌بعدی جسم استخراج شده است. برای بهبود دقت در عملیات

پانویس

1. noise

منابع (References)

- Zolfaghari, H. and Khalili, K., *On-Line 3D Geometric Model Reconstruction, Lecture Notes in Computer Science, Computational Science ICCS, Part II, LNCS5102*, pp. 146-152 (2008).
- Hu, Z., Guan, Q., Liu, S. and Chen, S.Y. "Robust 3D shape reconstruction from a single image based on color structured light", *International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence* (2009).
- Khalili, K., Razavi, S.A. and Karimzadgan, D. "High resolution measurements using a low resolution system", *Measurement Science Review*, **5**(1), pp.56-59 (2005).
- Yu, K., Park, N., Lee, D. and Solgaard, O. "Superresolution digital image enhancement by subpixel image translation with a scanning micromirror", *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE* (2007).
- Hattori, K. and Sato, Y. "Accurate rangefinder with laser pattern shifting", *Pattern Recognition, IEEE* (1996).
- Xiangdong, L. and Ehrich, R.W. "Subpixel edge location in binary images using dithering", *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE* (1995).
- Khalili, K. Nazemsadat, S.M. "Improved accuracy of on-line tire profile measurement using a novel on-line calibration", *Proceeding of Seventh IASTED International Conference*, pp. 59-63 (2007).
- Khalili, K. and Emam, S.M. "3D Model reconstruction of web production with image processing technique", *Sharif journal*, **29-3**(1), pp. 113-124 (2011).

